

## **ALÜMİNYUM KÖPÜKLERİN MEKANİK ÖZELLİKLERİ**

Nazım Mahmutyazıcıoğlu, Tolga Uçak, Sabri Altıntaş  
Boğaziçi Üniversitesi, İstanbul

### **ÖZET**

Bu çalışmada alüminyum köpüklerin basma ve eğme yükleri altında davranışlarından bahsedilmiş, kullanımlarının avantajlı olduğu uygulama alanları örneklerle açıklanmıştır. Alüminyum köpüklerinin mekanik özelliklerinin nasıl iyileştirilebileceğine örnek verebilmek amacıyla AlMgSi alaşımı köpükler üretilmiş, ısıtılma işlemi ve seramik parçacık katılmasının malzemenin ezilme davranışı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Yapılan işlemler sonucunda elastik modül, akma dayanımı ve enerji emme değerlerinde artış sağlandığı görülmüştür.

### **ABSTRACT**

In this study, characteristic properties of aluminum foams such as high stiffness in bending and high energy absorption is discussed with examples. To show that energy absorption properties can be adjusted by heat treatment or ceramic particle addition, a heat treatable alloy, AlMgSi foam is manufactured by using powder compact melting technique. The effects of heat treatment and ceramic particle addition on the crushing behavior of the foams are studied. After ceramic addition and heat treatment an increase in elastic modulus, compression yield strength and total energy absorbing capacity is observed.

### **GİRİŞ**

#### **Köpük Malzemelerin Mekanik Özellikleri**

Düşük yoğunlukları, alışılmışın dışında fiziksel ve mekanik özellikleri metal köpükleri farklı mühendislik uygulamaları için cazip hale getirmektedir. Örneğin sandviç panellerde maça malzemesi olarak kullanıldıklarında yapı hem hafif olmakta hem de rijitliği yüksek

olmaktadır. Metal köpükler basma yükü altında yüksek deformasyonlara uğrayabilmekte bu da enerji emme kapasitelerinin yüksek olduğunu göstermektedir. Bu özellikleri ile metal köpükler hafiflik kadar rijitliğin de önemli olduğu yapısal uygulamalarda ve yüksek enerji emme özelliği aranan örneğin, otomobillerde çarpışma anında araç içindeki sürücüyü aktarılabilecek enerjiyi azaltan, ezilme kutuları içinde kullanılabilirler.

Metal köpüklerin mekanik özelliklerini üretildikleri malzemenin mekanik özellikleri belirler. Alüminyum veya alüminyum alaşımı bir köpük malzeme ile titanyum veya nikel bir köpük malzemenin mekanik özellikleri farklı olur. Aynı malzemedan üretilmiş köpükler için mekanik özelliklerinin belirlenmesinde en önemli olan parametre bağıl yoğunluktur. Bağıl yoğunluk metal köpüğün yoğunluğunun köpüğün üretildiği matris malzemenin yoğunluğuna oranıdır ( $\rho/\rho_m$ ). Genel olarak köpük malzemede bağıl yoğunluk ne kadar yüksek olursa mekanik dayanımı da o kadar iyi olmaktadır.

Hücreli yapı malzemeler içerdikleri boşlukların yapısına göre kapalı ya da açık gözenekli olarak ikiye ayrılır. Açık gözenekli malzemeler sünger olarak da adlandırılmaktadır. Köpükler ise kapalı gözenekli malzemelerdir. Basma yükleri altında köpüklerde akma gerilmesinden sonra süngerlerden farklı olarak birim uzama ile yavaşça artan gerilmeler dikkat çekmektedir. Bu artışın sebebi köpüklerde hücre duvarlarını birleştiren yüzeylerin de ezilme sırasında yük taşımasıdır [1]. Süngerlerde olmayan bu yüzeyler sayesinde kapalı gözenekli köpük malzemelerin basma yükü altındaki dayanım değerleri daha yüksek çıkmaktadır.

İdeal bazı hücre geometrileri dikkate alınarak köpüklerin üretildiği malzeme, köpüğün yoğunluğu ve hücreli yapının tipi (açık, kapalı) ile mekanik özellikleri arasında bazı bağıntılar geliştirilmiştir. Örneğin köpük yoğunluğu ile elastik modül arasında Gibson ve Ashby kübik bir köpük yapısına uyguladıkları model ile:

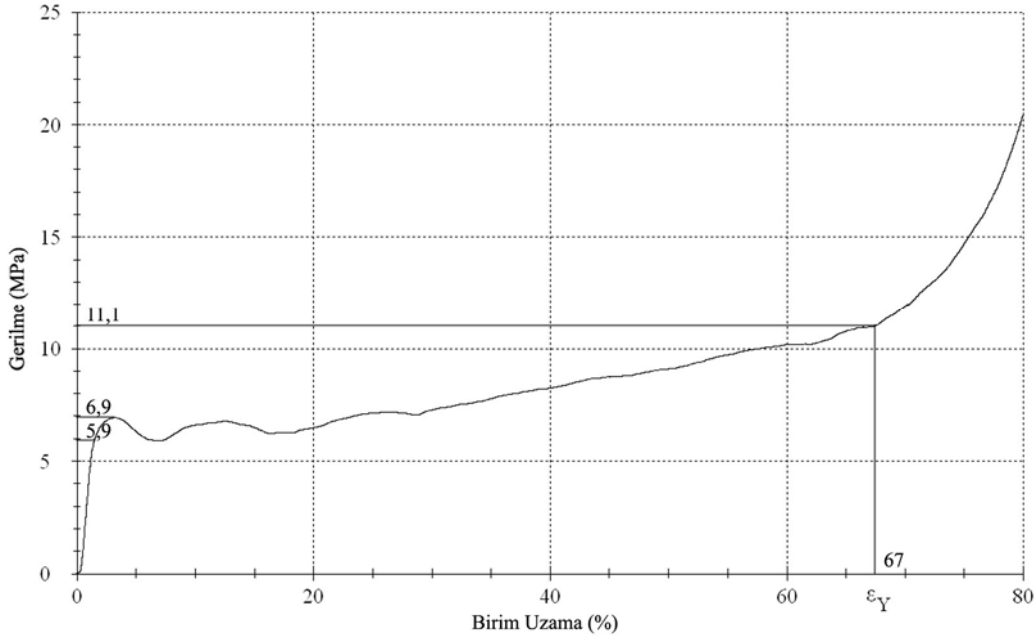
$$\frac{E}{E_m} \approx \left( \frac{\rho}{\rho_m} \right)^2 \Rightarrow E = (0,1-4) E_m \left( \frac{\rho}{\rho_m} \right)^2 \quad (\text{açık gözenek})$$

$$\frac{E}{E_m} \approx \phi^2 \left( \frac{\rho}{\rho_m} \right) + (1-\phi) \frac{\rho}{\rho_m} \Rightarrow E = (0,1-1,0) E_m \times \left[ 0,5 \left( \frac{\rho}{\rho_m} \right)^2 + 0,3 \left( \frac{\rho}{\rho_m} \right) \right] \quad (\text{kapalı gözenek})$$

bağıntılarını önermişlerdir [2]. Burada m indisi köpüğün yapıldığı matris malzemenin elastik modülü ve yoğunluğunu göstermektedir,  $\phi$  ise kapalı gözenekli köpükler için hücre duvarlarında bulunan malzeme oranını göstermektedir. Yukarıda verilen denklemler açık gözenekli süngerler için deformasyon mekanizmasının hücre kenarlarının eğilmesiyle kapalı gözenekli köpükler için ise hücre duvarlarının gerilmesiyle olduğu haller için geçerlidir. İkinci denklemde verilen katsayılar ise yapılan basma deneyleri sonuçlarına eğri uydurularak elde edilen ampirik değerlerdir. Formüller kullanılarak piyasada mevcut bir çok köpük malzeme için elastik modül-bağıl yoğunluk hesaplamaları yapılabilmektedir.

Metal köpüklerin basma yükleri altındaki karakteristik davranışı akma noktasına kadar doğrusala yakın bir gerilme artışı, akma noktasından sonra uzun birim şekil değiştirme bölgesi boyunca sabit kalan veya yavaşça artan gerilme değeri ve son bölgede yoğunlaşma

birim şekil değiştirmesinin aşılmasıyla hızla artan gerilme değeri olarak özetlenebilir. Gerilmenin az değiştiği akma gerilmesi ( $\sigma_{ak}$ ) değerinden yoğunlaşmanın başladığı birim şekil değiştirmeye denk gelen gerilme değeri plato bölgesi olarak da adlandırılır. Plato bölgesi malzemedeki boşluklu yapının tümüyle çökmesi ile sona erer ( $\epsilon_Y$ ) ve sonrasında hızlı bir gerilme artışı görülür (Şekil 1).



Şekil 1. 6061 alüminyum alaşımı bir köpüğün ezilme davranışını gösteren Basma Gerilmesi-Birim Şekil Değiştirme eğrisi.

Şekil 1 de görüldüğü üzere akma gerilmesinden sonra yoğunlaşma birim uzamasına kadar devam eden plato bölgesinde az bir değişim gösteren gerilme değeri plato gerilmesi  $\sigma_{pl}$  olarak adlandırılır.  $\sigma_{pl}$  ve  $\epsilon_Y$  değerleri ile bağıl yoğunluk arasındaki bağıntı Ashby ve Gibson tarafından köpükler için aşağıdaki şekilde verilmiştir [1]:

$$\sigma_{pl} \approx (0,25 - 0,35 \text{ arası}) \sigma_{ak,m} \left( \frac{\rho}{\rho_m} \right)^n \text{ (MPa)}$$

$$\epsilon_Y \approx \left( 1 - \alpha_1 \frac{\rho}{\rho_m} \right)$$

$\sigma_{ak,m}$  = matris malzemenin akma dayanımı,  $\rho_m$  = matris malzemenin yoğunluğu,  
 $\rho$  = köpüğün yoğunluğu.

Genel olarak, köpük malzemelerde  $n$ ; 1,5 ile 2,0 arasında,  $\alpha_1$  ise 1,4 ile 2 arasında değişmektedir. Bu değerler özellikle enerji-emme uygulamaları için önemlidir.

### Köpüklerin Enerji Emme Özellikleri

Çeşitli nesneler için nesnenin zarar görmeden tolere edebileceği hızlanma veya yavaşlama ivmesi  $g$  birimi olarak çeşitli değerler almaktadır. Bu limit değerlerle Newton kanunu kullanılarak en yüksek kuvvet hesaplanabilir:

$$F=ma^* \text{ (N)}$$

Burada  $a^*$ , değişik nesneler için kabul edilen sınır  $g$ -faktörleridir.

$$a^*=k \times g \text{ (m/sn}^2\text{)}$$

Örneğin, insan vücudu için sürekli kontak halinde bu değer 5-8  $g$ , 36 milisaniyelik bir kontak süresinde en hassas bölge olan baş kısmı için ise 55-60  $g$  arasındadır [1]. Otomobillerde ezilme kutularının sadece köpük malzemeden olduğunu ve toplam temas yüzeyinin  $A$  olduğu düşünülürse, köpük ezilmeye

$$F=\sigma_{pl} \times A \text{ (N)}$$

olduğunda başlar. Metal köpüklerin ezilme sırasında iyi enerji emebilmesi için plato gerilmesi bölgesinde uzun bir birim şekil değiştirmeye sahip olması istenmektedir. Plato gerilme değeri ise otomobil içindeki yolcunun ya da paketlenmiş bir ürünün zarar görmeyeceği en yüksek gerilme değerinden düşük olmalıdır. Bu durumda örneğin otomobil içindeki bir yolcuyu  $a^*$  yavaşlama ivmesinden koruyacak plato gerilme değeri

$$\sigma_{pl} \leq \frac{ma^*}{A} \text{ (MPa)}$$

olmalıdır. Plato gerilme değeri sağdaki değerden büyük olduğunda yolcuya zarar verebilecek ivme değerlerine ulaşılır. Köpük plato gerilme değeri yukarıdaki değerden düşük en yüksek enerjiyi emebilen malzemeler arasından seçilmelidir. Köpük malzemelerin basma testleriyle elde edilen  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrileri altındaki alanı yoğunlaşma birim şekil değişimine kadar yaklaşık olarak  $\sigma_{pl} \times \epsilon_Y$  kabul edildiğinde, plato gerilmesi ve birim uzama ne kadar yüksek olursa birim hacim başına o kadar fazla enerji emileceği görülecektir. Plato gerilmesi için üst limit yukarıdaki ivmelenme denklemi belirlemektedir. Özellikle ağırlığın çok önemli olduğu paketleme ve otomobil endüstrisinde tercih edilebilecek düşük ağırlıkta kütle başına en yüksek enerjiyi emebilen alüminyum köpük,

$$W_M = \frac{\sigma_{pl} \times \epsilon_Y}{\rho} \text{ (kJ/kg)}$$

değeri en yüksek olanlar arasından seçilmelidir. Şekil 1 de  $\sigma$ - $\epsilon$  eğrisi verilen 0,37 gr/cm<sup>3</sup> yoğunluğundaki alüminyum köpük için ortalama plato gerilme değeri 8,5 MPa, yoğunlaşma birim uzama değeri 0,67 alındığında, kütle başına emdiği enerji değerinin yaklaşık olarak 15 kJ/kg olduğu görülecektir. Bu değeri arttırabilmek aynı yoğunlaşma birim şekil değiştirmesi için ancak basma dayanımının ve plato gerilme değerinin arttırılmasıyla olabilir. İlk bakışta daha yoğun köpükler kullanılabileceği düşünülebilir. Ancak yoğunluğun artması dayanım ve plato gerilmesini arttırmakla birlikte yoğunlaşma birim uzamasını düşürmektedir. Erken gerçekleşebilecek yoğunlaşma sonrasında hızla artan gerilme değeri malzemenin istenen görevi yapmasını engelleyebilir. Ayrıca köpük yoğunluğunun artması toplam kütlede de artışa sebep olacaktır. Köpük malzemelerin yoğunluğunu değiştirmeden üretim koşullarını iyileştirerek daha düzgün ve az kusurlu hücre yapıları köpük üretmek ve matris malzemesinin mekanik özelliklerini iyileştirmek daha doğru bir seçenek olarak gözükmektedir.

### **Alüminyum Alaşımı (6061) Metal Köpük Üretimi**

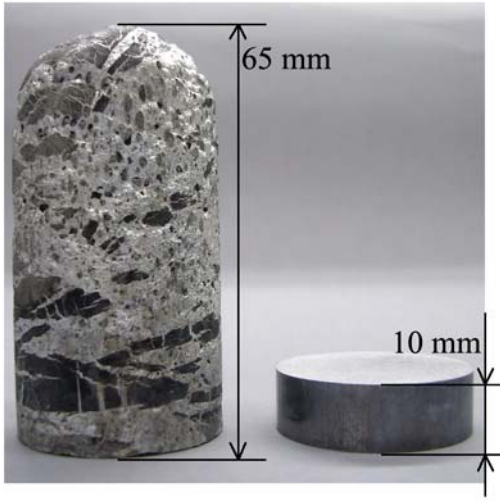
Farklı metal köpükler arasında üretim kolaylığı ve düşük yoğunluğu ile alüminyum köpükler öne çıkmaktadır. Günümüzde kapalı gözenekli alüminyum köpük üretimi doğrudan ve dolaylı olmak üzere temel olarak iki farklı yöntem ile gerçekleştirilmektedir [3]. Doğrudan köpürtme yöntemi içine metal olmayan katı parçacıklar karıştırılarak özel olarak hazırlanmış ergiyik metalde gaz baloncukları oluşturularak köpük üretilmesidir. Baloncuklar ergiyik içine hava ya da gaz üflenerek veya yüksek sıcaklıkta gaza dönüşen bir kimyasal katı olarak oluşturulmaktadır. Dolaylı yöntemler ise içinde düzgün olarak dağılmış köpürtme tozu bulunan katı bir metal matris ara üründen başlar. Metal matrisin eritilmesi ile bu ara ürün şişer ve köpüğü oluşturur. Bu çalışmada patenti Fraunhofer Enstitüsü'ne (Almanya) ait toz metalürjisi ile alüminyum köpük üretim yöntemi seçilmiştir. Yöntemin en önemli avantajı karmaşık köpük yapıların hassas bir şekilde üretilmesine olanak vermesidir.

### **MALZEME VE YÖNTEM**

Köpük üretimine ALPOCO, İngiltere'den temin edilen AA6061 (AlMg1SiCu) alüminyum alaşım tozu (53-150  $\mu$ m), ağırlıkça %0.6 titanyum hidrür, TiH<sub>2</sub> (Sigma Aldrich) ile karıştırılarak başlanılmıştır. Seramik katkılı köpük üretimi için; alüminyum alaşımı ve köpürtücü tozlara abrasif endüstrisinde kullanılan alümina, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, hacmen %5 ve %10 olmak üzere eklenerek, iki farklı karışım daha hazırlanmıştır. Sıcak sıkıştırma işlemi iç çapı 32 mm olan silindirik kalıplar içinde 430 °C de 260 MPa basınç altında 30 dakika süre ile gerçekleştirilmiştir. Toz karışımının sıcak sıkıştırma sonrası yoğunluğunun alüminyumun teorik yoğunluğu olan 2.70 g/cm<sup>3</sup>'e yakın olması yani boşluk miktarının en az seviyeye indirilmesi gerekmektedir. Köpürtücü toz, TiH<sub>2</sub>, açık gözenek kalmayacak şekilde metal matris içinde gömülü kalmalıdır. Bu sayede daha sonraki yüksek sıcaklıklarda gerçekleşen köpürtme aşamasında metal matrisin ergimesi ile köpürtücü tozdan açığa çıkan gaz uygun oranda köpürmeyi sağlayabilir. Köpürtme işlemi iç çapı 30-32 mm olan silindirik paslanmaz çelik kalıplar içinde önceden 760 °C ye ısıtılmış fırında gerçekleştirilmiştir. Şekil 2a da köpürtme için hazırlanmış ara ürün ve köpük malzeme görülmektedir. Köpürtme sonrasında elde edilen ürünlerin yoğunlukları ölçülmüş ve basma testleri için numuneler hazırlanmıştır (Şekil 2b).

## Basma Testi Sonuçları ve Değerlendirmeler

Üretilen alüminyum alaşımı ve seramik katkılı kompozit köpüklerin basma testleri 10 tonluk Zwick/Roell Universal test cihazında çelik basma plakaları arasında 5 mm/dak hız ile yapılmıştır. Köpüklerin üretiminde kullanılan AA6061 alüminyum alaşımının ısıtma işlemi ile dayanımın artırılması mümkün olmaktadır. Bu amaçla bir grup köpük köpürme işlemi sonrasında herhangi bir işleme tabi tutulmamış, diğer bir grup köpük ise 530 °C de 75 dakika fırında tutulup daha sonra su verilerek hızlı bir şekilde soğutulmuşlardır. Bu malzemelere su verme sonrasında sırasıyla 160 °C de 18 saat ve 175 °C de 6 saat yaşlandırma yapılmıştır. Seramik katkılı AA6061 kompozit köpükler de aynı ısıtma işlem safhalarından geçirilmişlerdir.



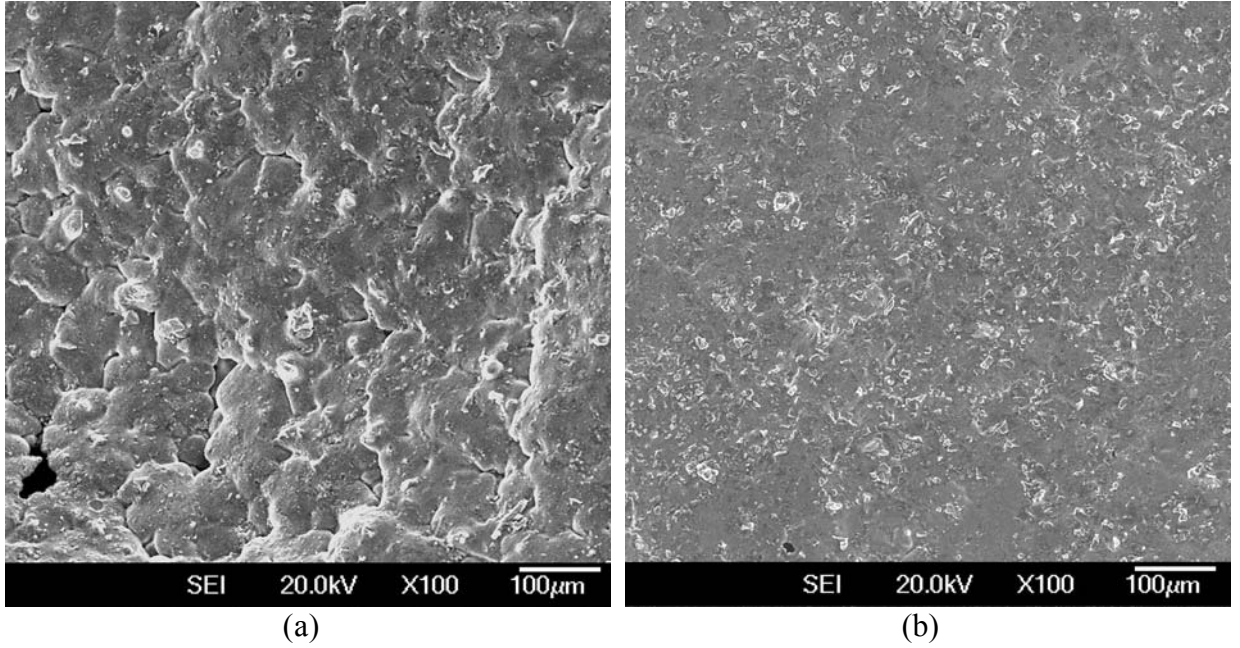
(a)



(b)

Şekil 2. (a) Köpürmeye hazır ara ürün ve köpük malzeme, (b) köpürtme sonrasında paralel olacak şekilde taban ve tavanı kesilerek basma testleri için hazırlanan numuneler (her karışım için en az 5 adet basma numunesi hazırlanmıştır).

Şekil 3 de seramik katkılı ve katkısız köpüklerin hücre duvarlarının genel bir görüntüsü verilmektedir. Seramik katkısı olmayan hücre duvarında seramik katkılı olana göre daha girintili çıkıntılı ve buruşuk bir yüzey gözlemlenmektedir. Ayrıca Şekil 3a da görüldüğü gibi köpürme sırasında ve sonrasında hücre duvarlarında delik veya boşluklar oluşabilmektedir. Bu kusurların köpürme ile genişleme-büyüme süresince hücre duvarlarının incelenmesi sonucunda veya gözeneklerin birbirlerine temas ederek yer değiştirmeleri sırasında oluştuğu düşünülmektedir. Malzemede ezilme ilk önce bu tip hücre kusurlarının bulunduğu, hücre yapısının bozuk olduğu veya köpürme sırasında birleşmeler sonucu büyük boşlukların oluştuğu kesitlerde olmaktadır. Malzemenin akma dayanımını belirleyen bölgeler de çoğu zaman bu zayıf bölgeler olmaktadır. Şekil 4 de kesit görünüşü verilen AA6061 köpük malzemenin üst yarısında bahsedilen yapıdaki gözenekler dikkat çekmektedir. Basma testi yapıldığında muhtemelen ilk çökmeler şekilde görülen büyük gözeneklere yakın yerlerde gerçekleşecektir. Üretim yönteminden kaynaklanan zorluklar basma deneyi öncesinde bu tip kusurların varlığının tespitini engellemektedir.



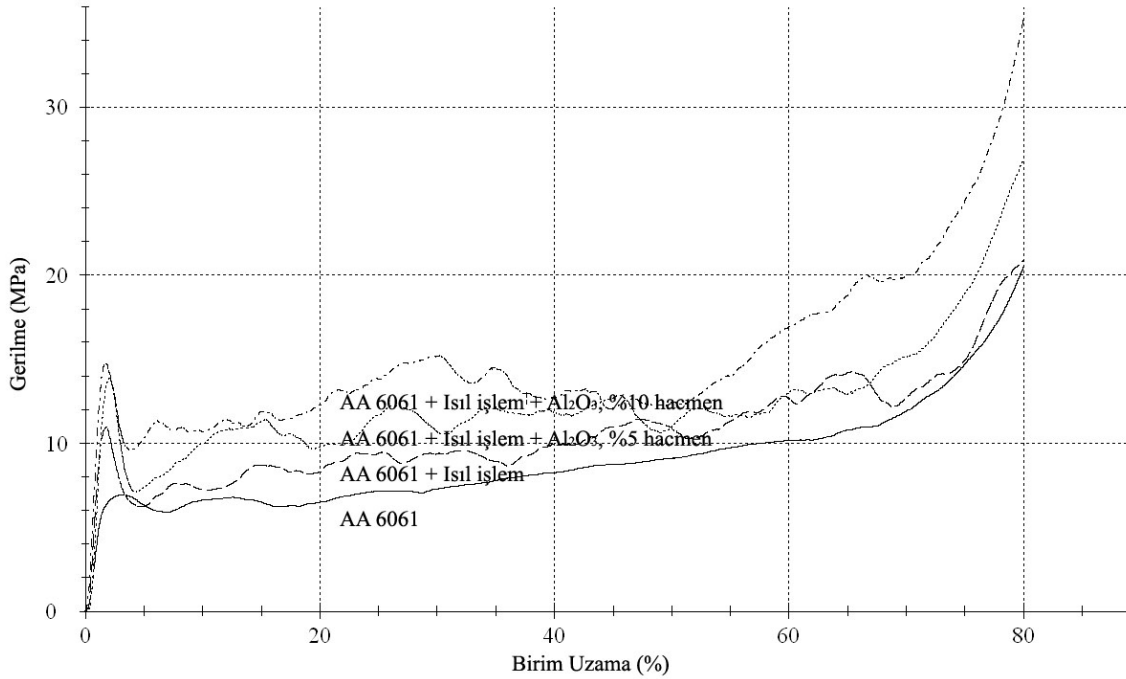
Şekil 3. Köpük duvarlarının yapısı (a) ısıtılma sonrası AA 6061, (b) ısıtılma sonrası AA 6061 +  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (hacmen %5).



Şekil 4. Üretilen köpüklerin kesitleri alındığında yapıda büyük gözeneklerin oluşabildiği gözlemlenmektedir.

Üretilen köpüklerin basma gerilmesi-birim uzama eğrileri Şekil 5 de görülmektedir. Isıl işlemde geçen köpüklerde akma dayanımının ve plato geriliminin arttığı görülmektedir. Ayrıca seramik katkı oranıyla birlikte kompozit köpüklerin kendi aralarında belirgin fark olmamakla birlikte seramik katkısı olmayan köpüğe göre dayanım ve plato gerilmesinin arttığı görülmektedir. Burada dikkat edilmesi gereken yoğunluğu daha yüksek olan alüminanın katılması ile köpüğün yoğunluğunun da artmasıdır. Tablo 1 de yapılan testler sonrası ölçülen elastik modül, basma dayanımı ve hesaplanan plato gerilmesi ile %60 yoğunlaşma birim uzaması dikkate alındığında birim kütle başına emilen enerji değerleri

verilmiştir. Özellikle ısıtıl işlem sonrasında elastik modülde iki kata yakın bir artma dikkat çekicidir. İlk yükleme anında lineer eğri üzerinden okunan elastik modül değerleri doğru olarak gözükse de yükleme anında çok küçük değerlerde bile bazı hücrelerde görülen akmalardan dolayı gerçek değerinden küçük çıkabilmektedir [1,4]. Aynı yoğunlukta ve seramik katkısı olmayan köpükler için elastik modül değerlerindeki fark ısıtıl işlem görmemiş köpüğün çok daha küçük yüklerde deforme olmasından kaynaklanan ölçüm hatalarından kaynaklanıyor olabilir. Seramik katkısı ile elastik modüldeki artma ise beklenen bir sonuçtur. Seramik katkısı ile elastik modüldeki değişim birkaç yolla olabilir. Öncelikle alüminanın elastik modül değeri alüminyumdan yüksek olduğundan hacmen %5 ve %10 eklendiğinde elde edilen kompozit malzemenin elastik modülü değişecektir. Köpüklerde elastik modül değerini etkileyen önemli yapısal özelliklerden biri de köpük hücre duvarlarındaki kıvrımlar, kırışıklıklar ve eğimlerdir. Şekil 3 de görüldüğü gibi alümina katkısı hücre duvarlarının yapısında değişimlere sebep olabileceğinden köpüğün elastik modül değerinde de değişim beklenebilir. Köpüklerin gerçek elastik modül değerleri basma sonrası plastik bölgeden yük boşaltma yapılarak veya ultrasonik yöntemler kullanılarak ölçülmektedir. Bu şekilde ölçülen elastik modül değerlerinin doğrudan ilk yükleme anında ölçülenlerden daha yüksek çıktığı bilinmektedir [4]. Ancak gerçekleştirilen basma testinde elde edilen elastik modül değerleri ısıtıl işlem görmüş seramik katkılı ve katkısız numunelerin karşılaştırılması amacıyla kullanılabilir.



Şekil 5. Dört grup AA6061 ve AA6061-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit köpük malzemeler için yapılan basma testlerinin sonuçları.



Tablo 1. AA6061 ve AA6061+Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> kompozit köpüklerin mekanik özellikleri.

Köpük	Seramik (Hacmen)	E (GPa)	$\sigma_{ak}$ (MPa)	$\sigma_{pl}$ (MPa)	Enerji (kJ/kg)	$\varepsilon_Y$ (%)	$\rho/\rho_m$ Bağıl Yoğunluk
AA6061	-	1	6	8	$\approx 12$	0,60	0,145
AA6061+Isıl İşlem	-	1,2	11	11,8	$\approx 18$	0,60	0,145
AA6061+Isıl İşlem	%5	1,3	12	13,2	$\approx 18$	0,60	0,160
AA6061+Isıl İşlem	%10	1,4	13,5	14,2	$\approx 18$	0,60	0,165

Şekil 5 de görüldüğü üzere ısıtılma işlem görmemiş köpüğün gerilim-birim şekil değiştirme eğrisi nispeten düzgün olarak değişmekteyken, ısıtılma işlem görmüş ve özellikle seramik katkılı numunelerde eğri yukarı-aşağı zikzaklı bir davranış göstermektedir. Özellikle, ilk yükleme anında, gerilim değeri pik yaptıktan sonra ani bir şekilde düşmekte daha sonra yavaş yavaş artarak seyrini sürdürmektedir. Bu davranış ısıtılma işlem sonrasında ve seramik katkısı ile sünek yapıda olan hücre duvarlarının ısıtılma işlem sonrası sertleşme ve kompozit yapının sayesinde gevrek hale dönüştüğünü göstermektedir. Benzer zikzaklı deformasyon eğrileri gevrek seramik köpüklerin ezilmesinde görülmektedir. Basma testleri sırasında deformasyonla kırılıp kopan parçalar da malzemenin gevrekleştiği fikrini desteklemektedir.

## Sonuçlar

Alüminyum köpüklerin karakteristik basma gerilmesi-birim uzama eğrilerinde gözlemlenen yüksek enerji emebilme kabiliyetleri dikkate alınmış ve ısıtılma işlem ile sertleştirilmeye uygun, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> katılmasıyla da kompozit olarak üretilen 4 farklı köpük çeşidi üzerinde basma testi yapılarak şu sonuçlara varılmıştır:

- AA6061 ısıtılma işlemle sertleştirildiğinde köpüğün akma dayanımı ve plato gerilmesi değeri artmaktadır. Elde edilen gerilme-birim uzama eğrisi ısıtılma işlem görmemiş köpüğe göre malzemenin daha gevrek olduğunu göstermektedir.
- AA6061'e katılan seramik miktarının artırılması, çok belirgin olmamakla birlikte, akma dayanımını, elastik modül ve plato gerilmesi değerini arttırmaktadır.
- Isıtılma işlem ve/veya seramik katkısı ile elde edilen köpüklerin basma gerilmesi-birim şekil değiştirme eğrisi altında kalan alan yani birim kütle için emilen enerji miktarı artmaktadır.
- Elastik modül ölçümleri doğrudan ilk yükleme anındaki lineer görünen eğrinin üzerinden yapılmıştır. Düşük basma yüklerinde bile bazı hücrelerde akmalar/ezilmeler olduğundan yapılan ölçümlerin gerçek değerlerinden düşük çıktığı düşünülmektedir.

- Alüminyum köpük matris malzemesi olarak ısıtıl işlem ile sertleşebilen alaşımların kullanılması ve seramik eklenmesiyle elde edilen köpüklerin mekanik özelliklerinde iyileştirme yapmanın mümkün olduğu görülmektedir.

## **Teşekkür**

Bu çalışma Devlet Planlama Teşkilatı (DPT-03K120250) ve Boğaziçi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri (BAP-07A603D) tarafından desteklenmektedir.

## **Referanslar**

- [1] Ashby, M.F., A.G. Evans, N.A. Fleck, L.J. Gibson, J.W. Hutchinson and H.N.G. Wadley, *Metal Foams: A Design Guide*, Butterworth Heineman, 2000.
- [2] Gibson, L.J., M.F. Ashby, *Cellular Solids-Structure and properties*, Cambridge University Press, 1999.
- [3] Banhart, J., “Manufacture, characterisation and application of cellular metals and metal foams”, *Progress in Materials Science* 46, 559-632, 2001.
- [4] Eds., Degischer, H.-P., B. Kriszt, *Handbook of Cellular Metals: Production, Processing, Applications*, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2002.